

AE



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 43 25 494 A 1**

⑤1 Int. Cl. 5:  
**G 01 B 11/30**  
< A 61 B 3/10 >

A61B 3/107

②1 Aktenzeichen: P 43 25 494.2  
②2 Anmeldetag: 29. 7. 93  
④3 Offenlegungstag: 28. 7. 94

DE 43 25 494 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1

21.01.93 DE 43 01 525.5 19.03.93 DE 43 08 949.6

⑦1 Anmelder:

Technomed Gesellschaft für med. und med.-techn.  
Systeme mbH, 52499 Baesweiler, DE

⑦4 Vertreter:

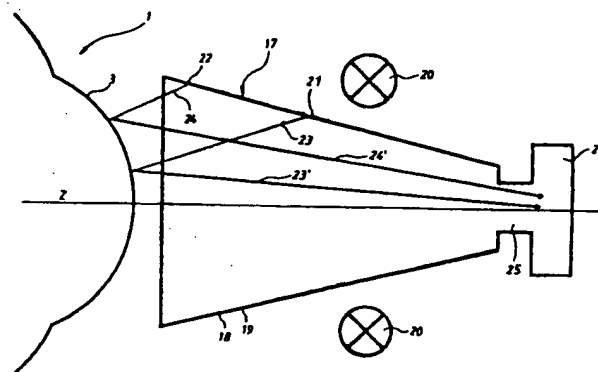
Liermann, M., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 52355 Düren

⑦2 Erfinder:

Jean, Benedikt, Prof. Dr.med., 88138 Sigmarszell,  
DE; Bende, Thomas, Dr.rer.nat., 72116 Mössingen,  
DE; Matallana-Kielmann, Michael, Dipl.-Ing. (FH),  
72070 Tübingen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche

⑤7 Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche beschrieben, wobei ein Projektionsmuster auf die Oberfläche projiziert wird und ein dadurch gebildetes Reflexionsmuster erfaßt und ausgewertet wird. Um die Zuordnung der Strukturen des Reflexionsmusters zu denen des Projektionsmusters zu verbessern, enthält das Projektionsmuster Erkennungsmarkierungen, welche die durchgehenden schwarz/weiß- bzw. hell/dunkel-Zonen individualisieren. Vorteilhaft ist eine Farbmarkierung oder Schraffur. Zum Aufbringen des Projektionsmusters auf eine Augenhornhaut (3) dient ein Projektionskörper (17), z. B. Hohlkonus, mit transparenten Ringen (19) in seiner Seitenwand (18). Er ist von einer ringförmigen Lichtquelle (20) umgeben. Als Detektor wird eine Farbvideokamera (26) verwendet.



DE 43 25 494 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Oberflächentopographie einer reflektierenden Oberfläche nach dem Oberbegriff der Ansprüche 1 und 13.

Derartige Verfahren sind insbesondere bei der Vermessung der Augenhornhaut basierend auf einem Moiré-Musterprojektionsverfahren unter der Bezeichnung Videokeratometrie bekannt. Hierunter versteht man die Projektion der sogenannten Placidoscheibe, d. h. eines Musters aus konzentrischen alternierend schwarzen und weißen Ringen, auf die menschliche Augenhornhaut. Die Reflexionen von der Hornhautoberfläche werden hierbei von einer Videokamera zur rechnerischen Verarbeitung aufgenommen. Von besonderem Interesse sind hierbei die Abstände oder Verformungen der Struktur des Reflexionsmusters im Vergleich mit einem Meßnormal.

Im Falle der Vermessung einer Augenhornhaut besteht das Meßnormal in einer bekannten Oberfläche, die für eine korrekte Auswertung/Bewertung der Hornhautoberfläche benötigt wird. Die Analyse der genannten Abweichungen vom Meßnormal liefert Aussagen über den Krümmungsradius der Hornhaut sowie über Abweichungen von einer sphärischen Oberfläche, wie sie bei einem Astigmatismus vorhanden sind.

Bekannte Druckschriften zu einem solchen Verfahren sind beispielsweise die US 4 978 213, US 4 863 260 und US 4 772 115.

Die Zuordnung des Reflexionsmusters zu den eingeblendeten Projektionsringen stellt sich bei diesem Verfahren häufig als schwieriges und nicht selten mit Fehlern behaftetes Unterfangen dar. Die Schwierigkeiten bei dieser Zuordnung sind besonders groß, wenn es infolge einer defekten Hornhautoberfläche zu Lücken im Reflexionsmuster eines ursprünglich in sich geschlossenen, auf die Hornhaut projizierten Rings kommt. Durch die falsche Zuordnung nicht zusammengehöriger Strukturen eines Reflexionsmusters zu einem bestimmten eingeblendeten Projektionsring ergeben sich gravierende Folgefehler, beispielsweise in Form einer falschen Bestimmung des Hornhautradius oder in Form einer falschen Bestimmung der Abweichungen der Hornhautoberfläche von der gewünschten Kugelfläche.

Außer der Einblendung eines ringförmigen Projektionsmusters ist auch die Verwendung eines gitterförmigen Linienmusters bekannt geworden. Hierdurch können jedoch die oben genannten Nachteile nicht behoben werden.

Die bislang bekannten Verfahren sind zudem äußerst empfindlich gegen Dejustierungen des Auges in der Z-Achse, d. h. in der Verbindungsachse zwischen dem Hornhautapex und der Bilderfassungseinheit.

Die Erfindung hat daher die Aufgabe, ein Verfahren zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche und insbesondere der Augenhornhaut vorzuschlagen, bei dem eine eindeutige und zuverlässige Zuordnung der Strukturen des von der Oberfläche reflektierten Reflexionsmusters zu denen des eingeblendeten Projektionsmusters gewährleistet ist.

Diese Aufgabe wird ausgehend von einem Verfahren der einleitend genannten Art durch die kennzeichnenden Merkmale der Ansprüche 1 und 13 gelöst. Durch die in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen werden zudem vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der Erfindung möglich.

che projizierten Projektionsmusters wenigstens eine von schwarz/weiß- bzw. hell/dunkel-Markierungen unterscheidbare zusätzliche Erkennungsmarkierung verwendet. Diese Verwendung besonders gekennzeichnete Zonen innerhalb des Projektionsmusters liefert in Verbindung mit hellen und dunklen Zonen ein zusätzliches Zuordnungskriterium der Strukturen des von der reflektierenden Oberfläche reflektierten Bildmusters zu dem auf die Oberfläche projizierten Projektionsmuster. Selbstverständlich wird die Anzahl der Zuordnungskriterien durch die Verwendung mehrerer solcher Erkennungsmarkierungen erhöht und somit diese Zuordnung weiter verbessert.

In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform wird als Erkennungsmarkierung eine Farbmarkierung verwendet. Die Strukturen des Reflexionsmusters können aufgrund solcher Farbmarkierungen problemlos dem entsprechenden Projektionsmuster zugeordnet werden. Insbesondere sind auch Überschneidungen zweier Markierungen durch das Auftreten der entsprechenden Mischfarbe erkennbar.

Denkbar wäre allerdings auch die Verwendung einer anderen Erkennungsmarkierung, beispielsweise einer Schraffur. Grundsätzlich ist nur zu beachten, daß die Erkennungsmarkierungen, im Falle einer Schraffur die Strukturen dieser Schraffur, in einem Projektionsmuster aus einheitlich durchgehenden schwarz/weiß- bzw. hell/dunkel-Markierungen erkennbar sind.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche ist in vielfältigen, nahezu beliebigen technischen Anwendungsbereichen verwendbar. In einer speziellen Anwendung wird dieses Verfahren zur Vermessung der Oberflächentopographie einer Augenhornhaut angewandt.

Dies wird in vorteilhafter Weise über einen von einer weißen Lichtquelle beleuchteten Projektionskörper mit transparenten Zonen in verschiedenen Farben bewerkstelligt. Es wäre jedoch ohne weiteres auch eine Anordnung von verschiedenfarbigen Lichtquellen, beispielsweise in Form eines Diodenarrays, denkbar.

In einer bevorzugten Ausführungsform wird der Projektionskörper in Form eines Hohlkonus oder eines Hohlkugels mit transparenten Farbringen in der Seitenwand ausgeführt. Durch die Verwendung derartiger Hohlformen, die mit ihrer konkaven Seite zum Auge hin angeordnet werden, kann der Projektionskörper mit vergleichsweise kleinem Durchmesser in Bezug auf die Z-Achse ausgeführt werden. Die Z-Achse ergibt sich, wie oben angeführt, durch die Verlängerung der Achse der Bilderfassungseinheit zur zu vermessenden Oberfläche hin.

Vorzugsweise wird ein Bilddetektor in Form einer Farbvideokamera verwendet. Es wäre jedoch ebenso die Verwendung einer schwarz/weiß-Kamera in Verbindung mit entsprechenden Farbfiltern denkbar. In diesem Fall würde die Messung der einzelnen Farbringe nacheinander mit entsprechendem Filterwechsel durchgeführt.

Vorteilhafterweise wird das Reflexionssignal von der Hornhautoberfläche integral in seiner Intensität gemessen. Dies dient zur Kompensation von Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung, die zufällig verteilt sind und sich auf diese Weise gegenseitig aufwiegen.

Besonders empfehlenswert ist es, die Signalverarbeitung automatisch in einer prozessorgesteuerten Auswerteeinheit mit Ausgabemonitor durchzuführen. In ei-

die Ergebnisse hierbei in Form von Isorefraktionslinien ausgegeben. Hiermit sind diejenigen Bereiche der Oberfläche gemeint, die im Verlaufe der beschriebenen Messung die gleiche Brechkraft aufweisen. Somit sind die Abweichungen vom Meßnormal direkt und ohne die Notwendigkeit einer weiteren Interpretation der Meßdaten sichtbar. Zur unmittelbaren Unterscheidung rechnerisch, beispielsweise mittels Interpolation, ermittelter Bildpunkte von gemessenen Werten kann eine unterschiedliche Darstellungsweise, beispielsweise transparent im Gegensatz zu opak, gewählt werden.

Mit einer derart automatisierten Auswerteeinheit ist zudem eine Steuerung der Projektionseinheit möglich. Dies bedeutet, daß sämtliche Parameter der Projektionseinheit mit den jeweiligen Ergebnissen der Auswerteeinheit im Hinblick auf eine größtmögliche Eindeutigkeit der Oberflächentopographie automatisch oder interaktiv optimiert werden.

Besonders wichtig bei dem genannten Verfahren ist eine gute Justage der Oberfläche, beispielsweise der Hornhautoberfläche, im Bezug auf die Bilderfassungseinheit in Z-Richtung. Die Abbildungseigenschaften der gesamten Anordnung hängen empfindlich von diesem Abstand ab. Die Justage in Richtung der Z-Achse wird vorzugsweise durch die Einblendung wenigstens zweier Zentrierungsobjekte im Projektionsmuster mit einem bestimmten Winkel zwischen ihren jeweiligen Einblendachsen durchgeführt. Der Schnittpunkt beider Einblendachsen gibt hierbei die gewünschte korrekte Z-Position wieder. Eine Verschiebung dieser Position in Z-Richtung wird bei einer derartigen Anordnung durch eine laterale Verschiebung der reflektierten Bilder der beiden Zentrierungsobjekte in Relation zueinander widerspiegelt. Selbstverständlich können auch die Zentrierungsobjekte farblich markiert sein, wobei sich bei einer Überlagerung beider Objekte vorteilhafterweise eine Mischfarbe ergeben kann.

Auch ohne korrekte Justage der Z-Position kann der hierdurch auftretende Fehler mittels der so ermittelten Abweichungen von der Soll-Position rechnerisch im Auswerteverfahren korrigiert werden.

Im Falle einer medizinischen Anwendung, insbesondere zur Bestimmung der Oberflächentopographie der Augenhornhautoberfläche, kann eine Meßvorrichtung, die nach dem genannten Verfahren arbeitet, direkt an ein Operationsmikroskop angekoppelt werden, wodurch der operierende Arzt direkt in die Lage versetzt ist, Hornhautbereiche mit Abweichung von der gewünschten Geometrie zu erkennen und unmittelbar entsprechend zu behandeln.

Durch die Verwendung einer hochauflösenden Kamera in Verbindung mit einer entsprechenden Zoomoptik kann diese Technik auch zur Messung mit einer Auflösung im Mikrometerbereich durchgeführt werden. Somit ist die Messung kleinster Veränderungen in der Rauigkeit innerhalb kleinerer Oberflächensegmente der Hornhaut möglich.

Zur Herstellung eines entsprechenden Hohllellipsoiden bei der Verwendung eines statischen Projektionskörpers sind verschiedene Verfahren denkbar.

Eine Möglichkeit hierzu bietet beispielsweise die sogenannte Folientechnik. Hierbei wird zunächst eine Farbfolie mit kreisförmigen, mehrfarbigen Ringen erstellt, anschließend an einen Projektionskopf mit der Form eines Hohllellipsoiden angepaßt und schließlich eingeschweißt.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der sogenannten Sandstrahltechnik oder Mikropulverstrahltechnik. Hierbei werden

den aus mehreren farbigen Plexiglasblöcken Ringe in entsprechender Dicke und Farbe mittels einer Drehbank oder Fräseinheit abgestochen. Diese werden auf einer Negativform fixiert und miteinander verklebt. Dieser Verbund kann auch durch schichtweises Vergießen verschiedenfarbiger Kunststoffe hergestellt werden. Anschließend wird dieser Verbund, beispielsweise auf einer Drehbank, der gewünschten Geometrie angepaßt.

In einer dritten Ausführungsform wird ein transparenter Plexiglasrohling mit feinen eingeritzten Ringen entsprechend der späteren Farbringposition versehen. Der gesamte Rohling wird sodann schwarz eingefärbt. In den rillenförmig eingeritzten Ringen kann die schwarze Farbe anschließend entfernt und mit entsprechenden Transparentfarben ersetzt werden.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung sowie die zu lösenden Schwierigkeiten bei der Zuordnung zwischen Projektionsmuster und Reflexionsmuster werden in der nachfolgenden Zeichnung verdeutlicht und anhand der einzelnen Figuren im folgenden näher erläutert.

Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 das Reflexionsmuster von einem aus mehreren konzentrischen Ringen bestehenden Projektionsmuster im Falle einer gesunden, d. h. mit sphärischer Oberfläche versehenen, Hornhaut;

Fig. 2 ein Beispiel eines vergleichbaren Reflexionsmusters im Falle einer von der sphärischen Form abweichenden Hornhaut;

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Aufbaus zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit statischem Projektionskörper;

Fig. 4–6 die Bilder zweier Zentrierungsobjekte bei unterschiedlicher Stellung der Hornhaut in Richtung der Z-Achse bezüglich des Bilddetektors.

In Fig. 1 ist schematisch das Bild eines Auges 1 mit mandelförmigen Umriß 2 dargestellt, wie es von einem Bilderfassungssystem der oben beschriebenen Art erfaßt wird. Im Innern der Umrißlinie 2 ist der Umriß der Hornhaut 3 eingezeichnet. Konzentrisch zur Z-Achse (Kamera – Hornhautapex) sind verschiedene Reflexionsringe 4 bis 10 gezeigt. Im Innern dieser Ringe befinden sich zwei Zentrierungsobjekte, auf die weiter unten näher eingegangen wird. Die Ringe 4 bis 10 entsprechen in ihrem Abstand sowie in ihrer konzentrischen und kreisförmigen Anordnung dem reflektierten Bild von einer gesunden Hornhaut mit einer sphärischen Oberfläche.

Im Gegensatz hierzu zeigt Fig. 2 das entsprechende Bild bei deformierter Hornhaut, d. h. im Falle eines vorliegenden Astigmatismus. Die Strukturen 4' bis 8' stellen ebenfalls ein Reflexionsmuster von absolut konzentrischen und kreisförmigen Projektionsringen dar. Ihr Bild wird durch eine nicht sphärische Hornhautoberfläche deformiert. Teilweise weisen die Bilder 5', 6' der entsprechenden und ursprünglichen geschlossenen Projektionsringe sogar Lücken 13, 14 bzw. 13', 14' auf, während andere Strukturen 7', 8' starke Einbuchtungen 15, 16 zeigen. Bei einer normalen schwarz/weiß-Aufnahme, wie sie anders in der Zeichnung nicht darstellbar ist, wäre nun der Bereich 15 der Struktur 7' nicht eindeutig einem entsprechenden Projektionsring zuzuordnen. Dieser Bereich 15 könnte den Projektionsringen zuzuordnen sein, die bei gesunder Hornhaut (s. Fig. 1) die Reflexionsringe 5, 6 oder 7 ergeben. Entsprechend der Unsicherheit bei dieser Zuordnung ist die aus der Interpretation dieser Daten resultierende Oberflächentopographie unvollständig mit Fehlern behaftet.

Erfindungsgemäß werden jedoch die Ringe 4 bis 10 bzw. die Strukturen 4' bis 8' durch eine entsprechende Farbgebung des Projektionsmusters eingefärbt. Somit ist auch im Falle eines stark deformierten Reflexionsbildes (s. Fig. 2) eine eindeutige Zuordnung möglich.

Fig. 3 zeigt eine schematische Schnittdarstellung eines Aufbaus, wie er für die Durchführung des erfindungsgemäßen Meßverfahrens verwendet werden kann. Vor dem Auge 1 mit der gewölbten Hornhaut 3 befindet sich ein Projektionskörper 17.

Der Projektionskörper 17 besteht aus einem konusförmigen Hohlkörper, dessen Seitenwand 18 mit ringförmigen transparenten und verschieden eingefärbten Durchlässen 19 versehen ist. Von außen wird der konusförmige Projektionskörper 17 durch eine ringförmige Neonröhre 20 beleuchtet. Anhand zweier von verschiedenen eingefärbten ringförmigen Durchlässen 21, 22 ausgehenden und durch Linien 23, 34 symbolisierten Lichtstrahlen wird verdeutlicht, wie die Ringstrukturen auf die Hornhaut projiziert werden. Die an der Hornhaut 3 reflektierten Strahlen 23' und 24' laufen durch eine Lochblende 25 am schmalen Ende des konusförmigen Projektionskörpers 17 und werden in einem Bilddetektor 26 abgebildet.

Die Zentrierungsobjekte 11, 12, die zur Erzeugung der Bilder in den Fig. 4 bis 6 unter einem bestimmten Winkel zwischen ihren Einblendachsen in einer Ebene, in der auch die Z-Achse liegt, eingeblendet werden, weisen entsprechend der Position der Hornhaut auf der Z-Achse bezüglich des Schnittpunktes der Einblendachsen eine unterschiedliche Orientierung zueinander auf. In den Fig. 4 bis 6 werden die Bilder der Zentrierungsobjekte gezeigt, wobei sich die Hornhautoberfläche 3 einmal vor diesem Schnittpunkt, einmal genau im Schnittpunkt und einmal hinter dem Schnittpunkt befindet. Durch die Anordnung der Bilder dieser Zentrierungsobjekte 11, 12 kann die Z-Position der Hornhautoberfläche 3 ermittelt und für die Auswertung verwendet werden.

- 1 Auge
- 2 Umriß
- 3 Hornhautoberfläche
- 4 Ring
- 5 Ring
- 6 Ring
- 7 Ring
- 8 Ring
- 9 Ring
- 10 Ring
- 11 Zentrierobjekt
- 12 Zentrierobjekt
- 13 Lücke
- 14 Lücke
- 15 Einbuchtung
- 16 Einbuchtung
- 17 Projektionskörper
- 18 Seitenwand
- 19 Durchlaß
- 20 Neonröhre
- 21 Durchlaß
- 22 Durchlaß
- 23 Strahl
- 24 Strahl
- 25 Lochblende
- 26 Bilddetektor

# Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche, wobei ein Projektionsmuster statisch auf die Oberfläche projiziert wird und ein von den zugehörigen Reflexionen auf der Oberfläche gebildetes Reflexionsmuster erfaßt und ausgewertet wird, dadurch gekennzeichnet, daß zur verbesserten Zuordnung der Strukturen (4 bis 10) des Reflexionsmusters zu denen des Projektionsmusters wenigstens eine von einheitlichen, durchgehenden schwarz/weiß- bzw. hell/dunkel-Zonen unterscheidbare Erkennungsmarkierung zur Kennzeichnung der Strukturen des Projektionsmusters verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Erkennungsmarkierung eine Farbmarkierung verwendet wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Erkennungsmarkierung eine Schraffur der entsprechenden Zone des Projektionsmusters verwendet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächentopographie einer Augenhornhaut bestimmt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsmuster über einen Projektionskörper (17) mit transparenten, wenigstens teilweise mit wenigstens einer Farbe eingefärbten Lichtdurchlässen (19, 21, 22) erzeugt wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Projektionskörper (17) ein Hohlkonus oder ein Hohl ellipsoid mit transparenten Ringen (19, 21, 22) in seiner Seitenwand (18) verwendet wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Detektor eine Farbvideokamera (26) verwendet wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine schwarz/weiß-Kamera in Verbindung mit einem oder mehreren entsprechenden Farbfiltern verwendet wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine integrale Intensitätsmessung der Reflexionsstrukturen zur Kompensation von Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung durchgeführt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Signalverarbeitung der Ausgangssignale des Bilddetektors (26) automatisch in einer prozessorgesteuerten Auswerteeinheit durchgeführt wird, wobei auf einem Ausgabemonitor Isorefraktionslinien der vermessenen Oberfläche dargestellt werden.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mit Hilfe der Auswerteeinheit eine Steuerung zur Optimierung des Projektionsmusters im Hinblick auf eine eindeutige Oberflächentopometrie durchgeführt wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Position der zu vermessenden Oberfläche entlang der Z-Achse, d. h. entlang der Verlängerung der Achse des Bilddetektors, durch die Einblendung wenig-

nem Winkel zwischen ihren Einblendachsen erfaßt wird, wobei der Schnittpunkt beider Einblendachsen die korrekte Z-Stellung angibt.

13. Vorrichtung zur Bestimmung der Topographie einer reflektierenden Oberfläche, mit einer Projektionseinheit zur statischen Projektion eines Projektionsmusters auf die Oberfläche, einer Bilderfassungseinheit zur Erfassung des von den Reflexionen auf der Oberfläche gebildeten Reflexionsmusters und einer Auswerteeinheit zum Vergleich des Reflexionsmusters mit einem Meßnormal, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektionseinheit für eine Markierung des Projektionsmusters mit einer von einheitlichen, durchgehenden schwarz/weiß- bzw. hell/dunkel-Zonen unterscheidbaren Erkennungsmarkierung ausgebildet ist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

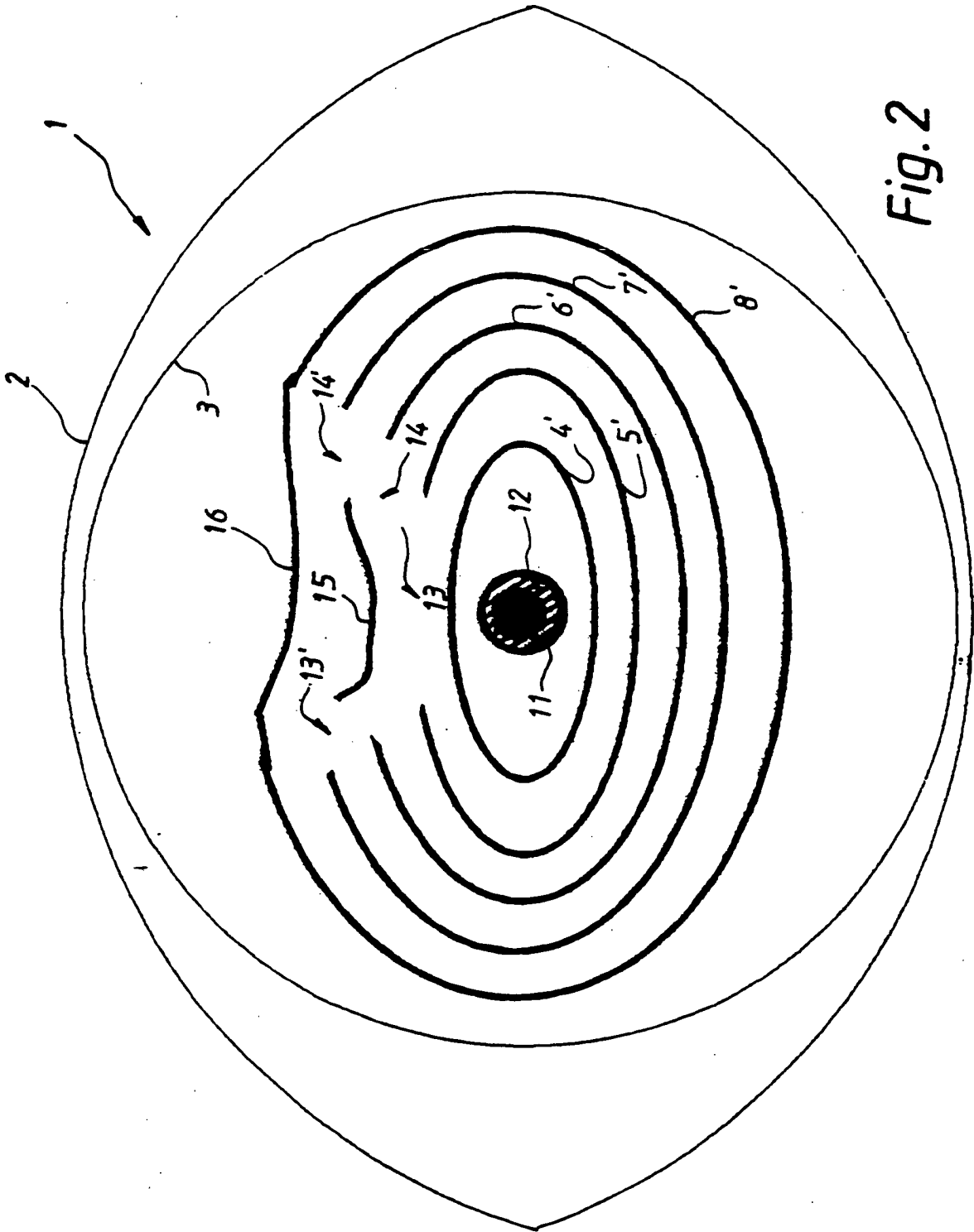
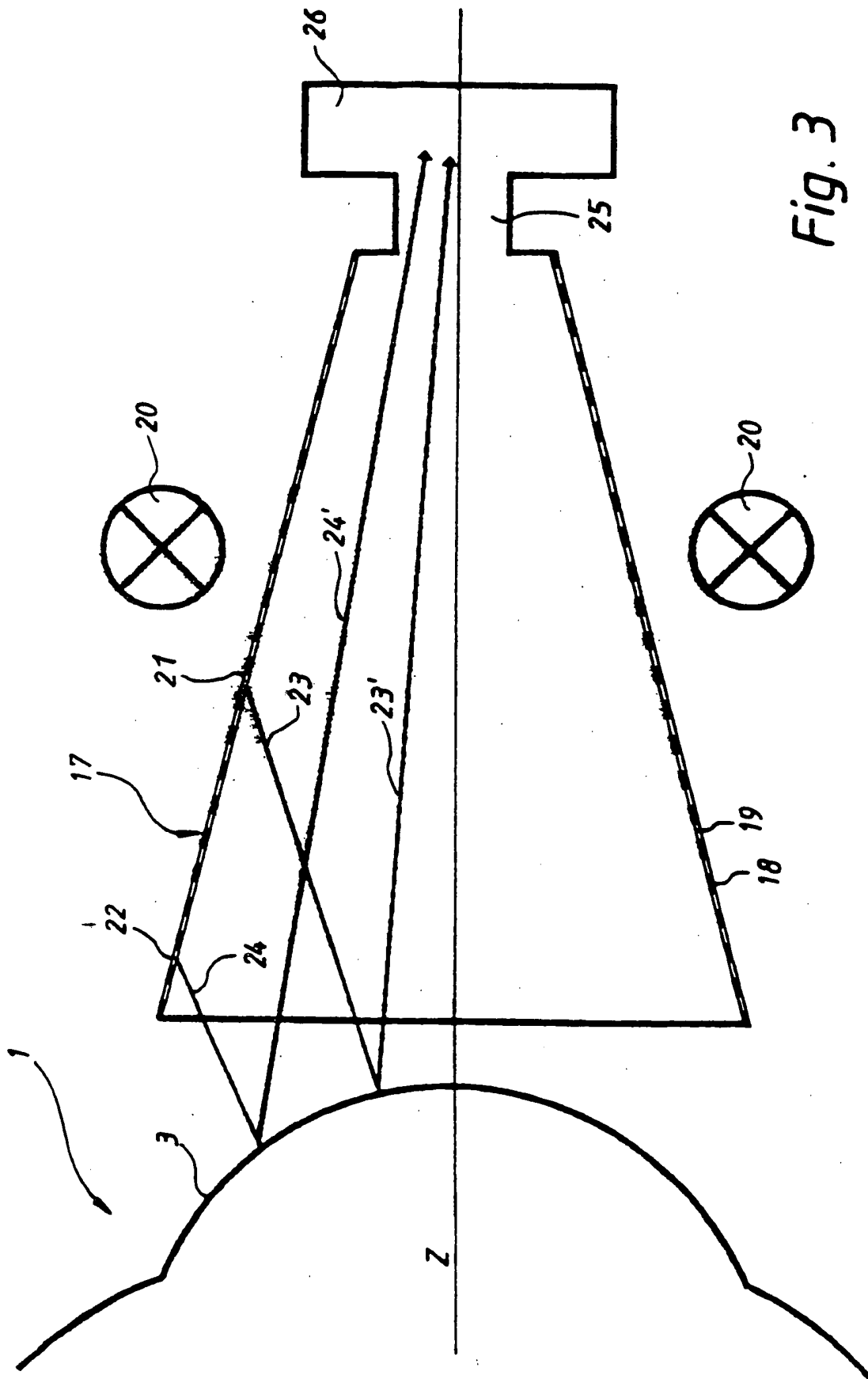
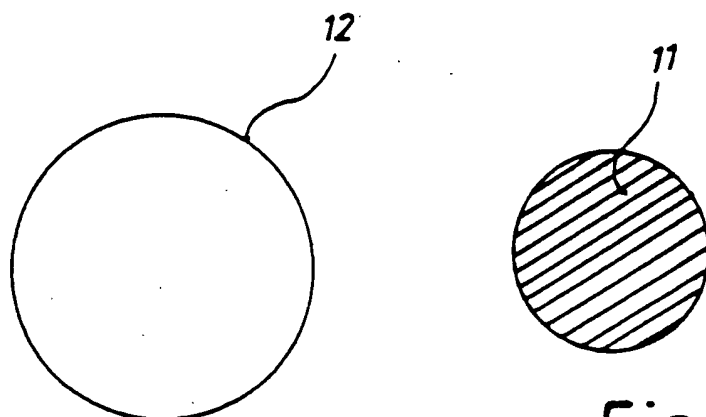


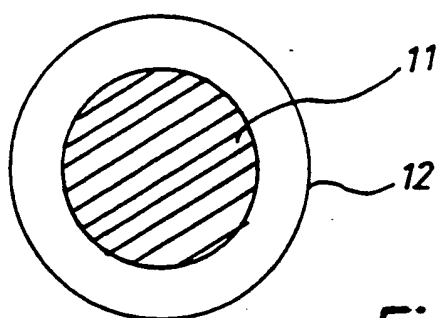
Fig. 2



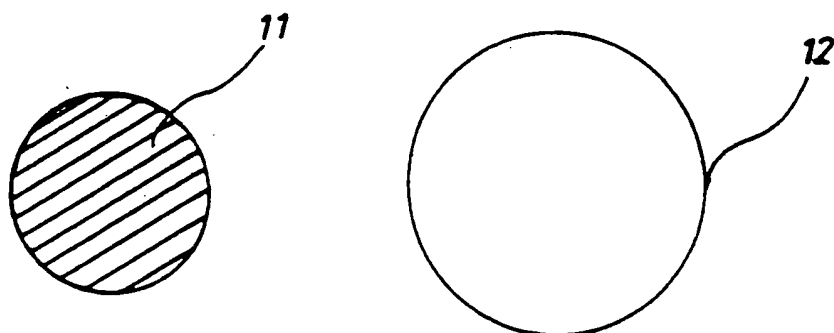




*Fig. 4*



*Fig. 5*



*Fig. 6*

